УДК 621.1.016

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ГАЗОПРОВОДА

С.В. Голдаев

Томский политехнический университет
Тел.: (382-2)-56-40-10

Предложена уточненная методика расчета оптимального диаметра газопровода, в которой учтена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от диаметра трубы и режима движения газа. Показано, что приближенная методика, предполагающая постоянным упомянутый коэффициент, дает на 10...12 % завышенные значения оптимального диаметра и на 2...3 % – суммарные затраты на строительство и эксплуатацию газопровода.

Доставка и распределение природного газа потребителям (промышленным, энергетическим, бытовым) требуют больших затрат денежных и материальных средств, в том числе одного из наиболее дефицитных видов проката – труб. Поэтому снижение стоимости и металлоемкости систем газоснабжения имеет важное значение [1]. При транспортировке газа по трубам преодолеваются гидравлические сопротивления, на что тратятся определенные энергетические затраты. Кроме того, поддержание газопровода в рабочем состоянии вызывает дополнительные издержки [2]. В связи с этим возникает необходимость расчета оптимальных значений диаметра газопровода D_{op} для транспортировки заданного количества газа.

Цель работы заключалась в том, чтобы на основе предложенного уточненного метода расчета D_{op} определить погрешность известного приближенного алгоритма [3].

Предполагались известными следующие исходные данные: молекулярная масса перекачиваемого газа (метан, пентан и т.п.) M; его объемный расход при нормальных физических условиях V_0, м^3/с; длина горизонтального газопровода L, м; КПД насоса η_n, передачи η_p, двигателя η_d. Стоимости: электроэнергии Ze_1 за 1 кВт·ч, амортизации Za_1 и эксплуатации трубопровода Zr_1 руб. в год на 1 м длины и 1 м диаметра.

В приближенной методике принималось, что коэффициент трения постоянен и равен λ_p, и что потери на местные сопротивления составляют k_m (k_m<1) от потерь на трение [3]. Такое допущение, использованное в [3], объясняется, вероятно, тем, чтобы вычисления не были итерационными. Как подчеркивается в [1], гидравлический расчет газопроводов следует выполнять с учетом зависимости коэффициентов гидравлического сопротивления от режима движения газа (ламинарный, переходный, турбулентный).

Расчет выполнялся для условной температуры T. Принималось (с последующей проверкой), что падение давления в трубопроводе невелико, и среднее давление примерно равно атмосферному.

Как известно [1], процесс оптимизации состоит из следующих операций: 1) составление целевой функции (ЦФ) и 2) отыскание значений параметров, при которых ее значение будет экстремальным.

Использовался экономический критерий оптимальности, учитывающий приведенные затраты. Суммарная годовая стоимость газопровода как функция диаметра D, выражалась уравнением [3]

$$E_s = B/D^5 + (Za_1 + Zr_1)LD,$$
$$B = Ze_n(1+k_m)(\lambda_p/2)L \cdot r_g(4V/\pi)^2, \quad (1)$$

где r_g, V – плотность газа и объемный расход газа; Ze_n – стоимость электроэнергии с учетом продолжительности эксплуатации газопровода в течении года.

С использованием аналитического условия минимума ЦФ ($\partial E_s/\partial D$=0, $\partial^2 E_s/\partial D^2$>0), в [3] получено выражение для оптимального значения диаметра газопровода

$$D_{opp} = [5B/(Za_1 + Zr_1)L]^{1/6}. \quad (2)$$

Уточненный метод расчета основывался на том, что коэффициент сопротивления являлся функцией от D и вычислялся следующим образом [4].

Для труб круглого сечения при ламинарном режиме течения газа (критерий Рейнольдса Re<2300) –

$$\lambda_{lm} = 64/\mathrm{Re}, \quad \mathrm{Re} = 4\rho V/(\mu D), \quad (3)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости.

При турбулентном режиме течения (Re > 2300) для шероховатых труб –

$$\lambda_{tb} = 0{,}11(k_{\text{экв}}/D + 68/\mathrm{Re})^{0{,}25}, \quad (4)$$

где $k_{экв} = 1,316k_w$ – эквивалентная шероховатость, учитывающая как среднюю высоту выступов, так и их форму, расположение в плане; k_w – средняя высота выступов шероховатости.

Аналитический метод поиска экстремума уточненной ЦФ, в которой коэффициент сопротивления вычисляется по формулам (3) или (4), приводит к необходимости численного решения трансцендентного уравнения. В данной работе для расчета минимума суммарной стоимости (1) использовался один из численных методов поиска [5]. При этом учитывалось свойство унимодальности ЦФ, т.е. наличие одного экстремума. Последовательно увеличивался диаметр трубы и вычислялось соответствующие значения ЦФ (1). Когда уменьшение Z_s сменялось возрастанием, то цикл прекращался, и полученные значения D и Z_s принимались за искомые. Затем определялись относительные погрешности значений диаметров (ε_D) и стоимости (ε_Z). Описанный алгоритм реализован в виде программного модуля в среде "Turbo Pascal".

Расчет приведенного в [3] примера показал следующее. При транспортировке метана, имеющего температуру T=303 K, объемный расход V_0=2,16 м³/с, на расстояние 4 км приближенное значение оптимального диаметра D_{opp} по формуле (2) равно 0,663 м. Расчет по уточненной методике определил значение D_{op} = 0,595 м. Погрешность при проведении сравнительного анализа составила 11,4 %. Среди труб, выпускаемых промышленностью, ближайшими к полученным значениям будут трубы с наружными диаметрами 0,630 и 0,720 м [1]. Реальное отличие составляет уже 14,3 %.

Суммарные затраты по уточненной методике на 2,5 % ниже. С увеличением объемного расхода газа погрешность приближенного метода возрастает (таблица).

Таблица. *Результаты расчета оптимального значения диаметра газопровода по приближенной и точной методиках*

V_0, м³/с	1,85	2,0	2,15	2,30	2,45
D_{opp}, м	0,614	0,639	0,663	0,686	0,709
D_{op}, м	0,554	0,575	0,595	0,616	0,635
ε_D, %	10,8	11,1	11,4	11,5	11,7
ε_Z, %	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8

Таким образом, установлено, что приближенная методика дает завышенные значения оптимального диаметра и суммарных затрат газопровода. Поэтому корректнее (даже в учебных целях) проводить расчет по уточненной методике.

В курсе "Надежность и оптимизация систем теплоэнергоснабжения промышленных предприятий", читаемом на кафедре "Теоретической и промышленной теплотехники" использован предложенный алгоритм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торчинский Я.М. Оптимизация проектируемых и эксплуатируемых газораспределительных систем. – 2-ое изд., перераб. и доп. – Л.: Недра,1988. – 239 с.
2. Ионин А.А. Газоснабжение: Учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 415 с.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учеб. пособие для вузов / Под ред. П.Г. Романкова. – 10-е изд. перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
4. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.
5. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.